BDSBAS 时间基准互操作方法研究与性能测试

刘成[1]，陈颖[1]，熊帅[2]，邵搏[2]，张键[2]，王威[1]

（1. 北京跟踪与通信技术研究所，北京 100094；2. 中国电子科技集团公司第二十研究所，西安 710068）

摘要：卫星导航星基增强系统（SBAS）由不同国家建设，所增强卫星星座和参考时间系统不尽相同，因此 SBAS 时间基准之间的兼容互操作一直是国际民航组织（ICAO）SBAS 标准研究中的重要技术问题。本文介绍了 SBAS 网络时间（SNT）概念和研究现状，结合 ICAO SBAS 标准与建议措施（SAPRs）制定，对 SNT 兼容互操作问题进行了分析和研究，并给出了目前最新的联合解决方案。在此基础上，对北斗星基增强系统（BDSBAS）地面状态进行了升级，并开展了服务性能初步测试。结果表明，BDSBAS 单频（SF）SNT 和双频多星座（DFMC）SNT 与参考 GNSS 时间基准之间的最大偏差分别为 37 ns、0.17 μs，满足 ICAO 标准要求；服务性能基本符合 APV-I 等级要求，证明了 BDSBAS 时间基准互操作的可行性和可靠性。

关键词：北斗；全球导航卫星系统；星基增强；双频多星座；星基增强网络时

中图分类号：V19　　文献标志码：A

基金项目：国家自然科学基金（42074044）；中国科协青年人才托举工程（2019QNRC001）；陕西省创新能力支撑计划项目（2021TD-03）；

Research and Performance Assessment of BDSBAS Time System Interoperability

LIU Cheng[1], SHAO Bo[2], ZHANG Jian[2], CHEN Ying[1], WANG Wei[1]

(1. Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094; 2. The 20th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Xi'an 710068)

Abstract: Since each SBAS is constructed by different countries, the augmented GNSS constellation and the reference time are not the same, the compatibility and interoperability between SBAS time systems has been one of the important issues in the SBAS standard research of the International Civil Aviation Organization (ICAO). The contribution introduces the concept and research status of the SBAS network time (SNT), combined with the formulation of ICAO SBAS Standards and Recommended Practices (SAPRs), analyzes and studies SNT compatibility and interoperability issues, and presents the latest joint solution. On this basis, the ground state of the BeiDou Satellite-Based Augmentation System (BDSBAS) was upgraded, and preliminary service performance assessment was carried out. The results show that the maximum deviations between the BDSBAS single-frequency (SF) SNT and dual-frequency multi-constellation (DFMC) SNT and the reference GNSS time reference are 37 ns and 0.17 μs, respectively, which meet the ICAO standards. The service performance basically conforms to the APV-I level requirements, which proves the feasibility and reliability of the interoperability of BDSBAS SNT.

Keyword: BeiDou; global navigation satellite system (GNSS); satellite-based augmentation system (SBAS); dual-frequency multi-constellation (DFMC); SBAS network time (SNT)

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (No. 42074044); Innovation Capability Support Program of Shaanxi Province (2021TD-03); Industrial Development Fund Project of CETC (20201121)

1 引言

目前，世界上已完成建设和正在开展建设的星基增强系统（Satellite-Based Augmentation System, SBAS）主要包括美国广域增强系统（Wide Area Augmentation System, WAAS）[1-3]、欧盟欧洲地球同步导航重叠系统（European Geostationary Navigation Overlay System, EGNOS）[4-5]、日本多功能星基增强系统（MTSAT Satellite-based Augmentation System, MSAS）[6-7]、印度 GPS 辅助型地球同步轨道增强系统（GPS-Aided GEO Augmented Navigation System, GAGAN）[8-9]、俄罗斯差分改正与监测系统（System of Differential Correction and Monitoring, SDCM）[10-11]、韩国星基增强系统（Korea Augmentation Satellite System, KASS）[12]、非洲及印度洋星基增强系统（SBAS for Africa and Indian Ocean, A-SBAS）[13-14]、澳大利亚/新西兰南部定位增强网（Southern Positioning Augmentation Network, SouthPAN）[15]以及我国北斗星基增强系统（BeiDou Satellite-Based Augmentation System, BDSBAS）等[16-19]，国际各国 SBAS 分布如图 1 所示。

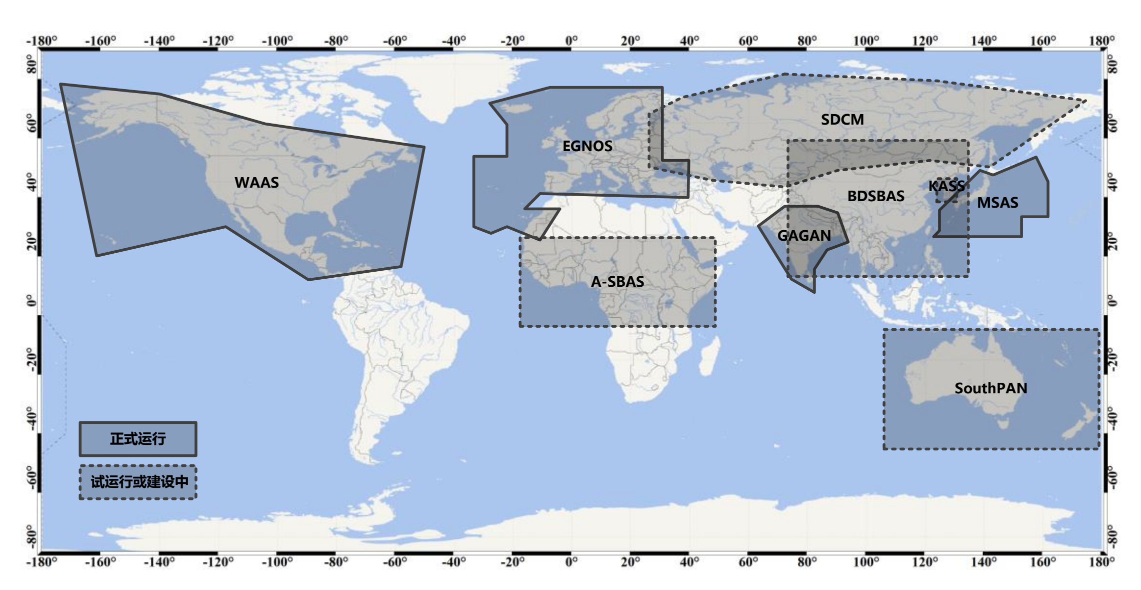


图 1　国际各国 SBAS 分布示意图

Fig.1　Distribution of the SBASs in the world

由于各 SBAS 由不同国家进行建设，所增强的全球导航卫星系统（Global Navigation Satellite System, GNSS）星座也不尽相同，因此如何顺利实现各 SBAS 之间的兼容与互操作成为重大挑战。为此，国际民航组织（International Civil Aviation Organization, ICAO）下设成立了星基增强互操作工作组（Interoperability Working Group, IWG），专门负责联合各 SBAS 服务供应商，共同开展 SBAS 国际标准的研究和制定工作。2012 年，IWG 已顺利完成单频（Single Frequency, SF）SBAS 标准与建议措施（Standards and Recommended Practices, SARPs）的制定工作，并提交 ICAO 审核颁布。2015 年起，IWG 启动了双频多星座（Dual-Frequency Multi-Constellation, DFMC）SBAS SARPs 草案的联合研究和制定工作，我国 BDSBAS 也从这一时期开始正式参与[20]。相比 SF SBAS，DFMC SBAS 将利用双频伪距测量值组合消除电离层误差，进一步提升定位精度和完好性；由于不再需要播发格网电离层改正数，因此 DFMC SBAS 可以实现对四个 GNSS 核心星座（BDS、GPS、GLONASS、GALILEO）的增强；同时，DFMC SBAS 还将实现更快的完好性告警时间（从 10s 提升至 6s）[21]。

在 SBAS SARPs 研究中，不同 SBAS 之间的时间基准互操作是主要技术问题之一。一方面，为了实现对 GNSS 的独立观测和完好性监测，SBAS 需要建立和维持一套独立的时间，称为 SBAS 网络时（SBAS Network Time, SNT），它们之间本身即存在着差异；另一方面，各 SBAS 所选择增强的 GNSS 星座也不尽相同，其改正数的时间基准问题也应该予以研究和明确。在 SF SARPs 制定过程中，由于当时仅存在 GPS、GLONASS 两个 GNSS 星座，SF

SBAS 的增强电文仅能够对 GPS 或 GLONASS 进行增强（因为电离层格网信息的播发占用了大量字节资源），因此 SF SBAS 的时间基准互操作问题相对而言较为容易解决。然而，在 DFMC SARPs 制定过程中，世界卫星导航格局已发生显著变化——随着北斗三号全球定位系统（BDS-3）的建成和 GALILEO 的加速建设，GNSS 核心星座已扩展为四个；同时，SBAS 的数量也进一步增加。这些发展和变化，都为 SBAS 时间基准的互操作带来了新的挑战。2020 年 11 月，DFMC SBAS SARPs 草案已通过 ICAO NSP/6 会议审议，并向 ICAO 航委会（Air Navigation Commission, ANC）提交审核，DFMC SBAS SARPs 草案明确了包括 SBAS 时间基准互操作在内的各项技术内容[22]。

本文从 SBAS 国际标准出发，介绍了 SNT 的基本概念和互操作现状。重点结合 ICAO SBAS SAPRs 草案的制定进展，对 SNT 的兼容互操作问题进行了分析和研究，并给出了目前的最新解决方案。在此基础上，根据 SBAS 互操作时间基准的国际标准最新要求，对 BDSBAS 工程和软件状态进行了升级，并给出了升级后的实测性能结果。相关内容能够为当前正在研制的 BDSBAS 接收机，特别是支持最新 DFMC 服务模式的 BDSBAS 接收机提供有益参考。

2 SBAS 相关时间基准

利用 SBAS 进行增强定位时涉及到两套时间基准系统——GNSS 时间和 SBAS 时间。本节分别对 GNSS 时间和 SBAS 时间进行介绍和分析。

2.1 GNSS 时间

2.1.1 GPS 系统时

GPS 系统时（GPS Time, GPST）通过安装在地面的原子钟与卫星原子钟共同维持。GPST 的起始历元为协调时的 1980 年 1 月 6 日（星期日）零时刻，自该时刻起，GPST 周而复始地计数。GPST 落后国际原子钟 19 s，美国海军天文台（The United States Naval Observatory, USNO）定期将其所维持的协调时与 GPST 比较，并控制 GPST，使之与国际原子时（Temps Atomique International, TAI）保持同步[23-25]。

$$\mathrm{TAI} = \mathrm{GPST} + 19\ \mathrm{s} \tag{1}$$

GPST 与协调时之间整数秒的差异随着协调时的跳秒不断变化，当前 GPST 与协调时之间的整数秒差增至 18 s[25]，即

$$\mathrm{GPST} \approx \mathrm{UTC} + 18\ \mathrm{s} \tag{2}$$

除了整秒差异外，GPST 与协调时之间存在着小于 1 μs 的秒内偏差，通常该偏差被控制在几百纳秒之内，甚至通常小于 20 ns（1σ）[26]。GPST 可用 GPS 周（WN）和 GPS 周内秒（SOW）表示，周内秒最小值为 0，最大值不超过 604800 s，在每星期六午夜零时从 0 开始逐渐增大，经过一周（即 604800 s）后又返回至 0，同时星期数（WN）增加 1。

2.1.2 北斗系统时

北斗系统时（BeiDou Time, BDT）与 GPST 一样采用原子时，以国际单位制（SI）秒为基本单位连续累计，起始历元为 2006 年 1 月 1 日协调世界时（UTC）00 时 00 分 00 秒。BDT 通过 UTC（NTSC）与国际 UTC 建立联系，BDT 与国际 UTC 的偏差保持在 50 纳秒以内（模 1 s），且无需闰秒[27]。但由于 BDT 与 UTC 保持在一定的公差范围以内，而 UTC 存在闰秒问题，因此 BDT 与 GPST 均存在与 UTC 之间的跳秒改正（通过广播电文播发）。并且，由于在 2006 年 1 月 1 日 00 时 00 分 00 秒 BDT 起算之前，GPST 已与 UTC 之间存在 14 s 的跳秒改正，因此 BDT 与 GPST 除了相差的 1356 周外，还始终保持一个 14 s 的系统差[28]。即两者之间存在如下关系：

$$\begin{cases} \text{BD 周} = \text{GPS 周} - 1356\ \text{周} \\ \text{BD 周内秒} = \text{GPS 周内秒} - 14\ \text{s} \end{cases} \tag{3}$$

图 2 中给出了目前 BDT 与 GPST 的实测结果，证明了 BDT 与 GPST 之间所保持的稳定的 14 s 时差（周内秒）。

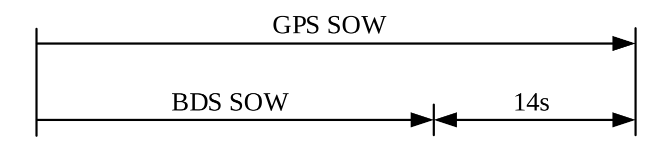


图 2　BDT 与 GPST 的周内秒时差

Fig.2　The time of week (TOW) difference of BDT and GPST

2.1.3　Galileo 系统时

Galileo 系统时（Galileo System Time, GST）是一个连续时间尺度，溯源到国际原子时 TAI，与 TAI 相差整数秒，不实施闰秒，保持偏差小于 50 ns。GST 的起始历元定义在 1999 年 8 月 22 日协调时（UTC）00 时 00 分 00 秒的基础上超前 13 s，与 GPST 保持一致[29]。到目前为止超前 UTC 18 s，即

$$\text{GST} = \text{UTC} + 18\ \text{s} \tag{4}$$

2.1.4　GLONASS 系统时

GLONASS 时间（GLONASS Time, GLONASST）采用莫斯科时间为标准，以俄罗斯维持的 UTC(SU)作为时间度量的标准。与上述几类 GNSS 时间系统不同，GLONASST 与 UTC(SU)具有相同的闰秒，因此不存在整秒差异。但它们之间存在 3 小时的整数偏移，且相差一个微小偏差（1 ms 以内），其相互关系为[-30-31]：

$$\text{GLONASST} \approx \text{UTC(SU)} + 3\ \text{h} \tag{5}$$

2.2　SBAS 时间

根据 ICAO 标准要求，各 SBAS 需要维持和使用一套自身的时间基准，称为 SBAS 网络时（SBAS Network Time, SNT）。SNT 定义为在满足 SBAS 总体性能要求的前提下，SBAS 利用自身地面监测站所维持的 GNSS 系统时间。本质上，这是 SBAS 出于独立观测和监视 GNSS 完好性的需要。当使用 SBAS 改正数时，用户定位将是在 SNT 下进行的，而非 GNSS 系统时（GNSS Time, GNSST）。然而，由于 SF SBAS 与 DFMC SBAS 的 SARPs 制定时间相差了数年，期间世界卫星导航格局发生了重大变化，因此这两类 SBAS 服务的时间基准要求也不相同。

2.2.1　SF SBAS 时间基准

ICAO SARPs 中关于 SF SBAS 的标准内容早在 2012 年即已完成制定，且目前 ICAO 暂时没有重新启动修订更新的计划。由于当时全球只有 GPS 和 GLONASS 两个 GNSS 系统，因此 SF SBAS 可选增强对象目前暂时只能是 GPS 或 GLONASS（二选一），可选 SNT 基准为 GPST。

但根据 ICAO SARPs 附件 10 第 I 卷中的要求，SF SBAS 的 SNT 只能以 GPST 为基准，且两者之间的差异需保持在 50 ns 以内[30]，即：

$$|\text{SNT}_{\text{SF}} - \text{GPST}| \le 50\ \text{ns} \tag{6}$$

2.2.2　DFMC SBAS 时间基准

2015 年，ICAO 开始组织各 SBAS 服务供应商，启动和开展 DFMC SBAS 标准的制定工作。由于中国和欧洲均开始建设自己的 GNSS（BDS-3 和 Galileo），GNSS 核心星座从 2 个

增加为 4 个，因此在完成相关技术内容的论证和确认后，DFMC SBAS 的可选增强对象也被扩展成 4 个（GPS/GLONASS/BDS/Galileo），相应地，在 DFMC SBAS SARPs 文件中，DFMC SBAS 的 SNT 也被调整为可从四大核心 GNSS 的系统时间中进行选择（可选 SNT 基准为 GPST/GLONASST/BDT/GST）。两者之间的差异需保持在 1 μs 以内[22]，即：

$$|SNT_{DFMC} - GNSST| \leq 1\ \mu s \tag{7}$$

DFMC SBAS SNT 基准信息通过 DFMC SBAS 电文类型（Message Type, MT）37 中的时间参考标识（Time Reference ID）字段参数进行播发（GPS 标识号：0；GLONASS 标识号：1；Galileo 标识号：2；BDS 标识号：3）。

3 SBAS 时间互操作方法与策略

3.1 SF SNT 互操作方法与策略

在 SF 服务模式下，由于只有俄罗斯 SDCM 选择增强本国的 GLONASS、而其他 SBAS 均选择增强 GPS，因此对于 SDCM 以外的其他 SBAS 而言，ICAO 所制定的这一时间同步要求是适用的——SBAS 播发 GPST 下的 GPS 卫星改正数，用户同时接收 GPS 广播星历和 SBAS 改正数进行解算，获得自身在 GPST 下的定位结果，无需额外操作。

然而，对于 SDCM 而言情况更为复杂。因为 SDCM 虽然播发 GLONASS 卫星改正数，但它的时间基准却是相对于 GPST 的。这意味着，用户需要额外做一次时间转换，将 GLONASS 卫星改正数从 GPST 换算至 GLONASST 下，才能与 GLONASS 卫星的广播星历配合，共同完成对 GLONASS 的增强定位。这可以通过以下两种途径实现：

a) 接收 GLONASS 广播星历、计算得到 GLONASST 相对于 UTC 的时差，同时接收 GPS 广播星历、计算得到 GPST 相对于 UTC 的时差，进而计算得到 GLONASST 与 GPST 之间的时差；
b) 在 GLONASS 广播星历中播发 GLONASST 与 GPST 之间的时差参数。

3.2 DFMC SNT 互操作方法与策略

在 DFMC 模式下，SBAS 可选择增强 GNSS 星座数量增加为 4 个，SNT 基准也可以由各 SBAS 供应商自行选择。在 2017 年制定形成的 DFMC SBAS SARPs 草案中，各 SBAS 供应商已明确了各自的选择对象，见表 1。

表 1 SBAS 供应商所选择的 DFMC 增强对象和 SNT 基准

Table 1 DFMC augmented constellations and SNT references of each SBAS provider

SBAS	DFMC SBAS 增强对象	SNT 参考基准
WAAS	GPS、Galileo	GPST
EGNOS	Galileo、GPS	GST
MSAS	GPS	GPST
GAGAN	GPS、Galileo	GPST
KASS	GPS、Galileo	GPST
SDCM	GLONASS、GPS	GLONASST
BDSBAS	BDS、GPS	BDT

表 1 中，“DFMC SBAS 增强对象”指的是该 SBAS 播发改正数的 GNSS 星座。至于航空机载接收机在该 SBAS 服务区域内究竟使用其中哪个 GNSS 星座及其增强改正数进行导航，由航空机载接收机设备厂商和各国民用航空主管部门确定。

由于 DFMC SBAS 对多个 GNSS 星座进行增强，涉及到更多的时间基准系统，因此 SNT 的互操作实现比 SF SBAS 更为复杂。根据 DFMC SBAS 原理，当用户使用电文类型（Message Type，MT）32 中的被增强 GNSS 卫星改正数进行定位解算时，对 GNSS 卫星钟差的改正值

$\delta\Delta t_{SV}$ 如式(8)所示：

$$\delta\Delta t_{SV}=\frac{\delta B+\delta\dot{B}\times\left(t-t_{D}\right)}{c} \tag{8}$$

其中，δB 为卫星时钟偏差改正数，$\delta\dot{B}$ 为卫星时钟偏差变化率改正数，c 为光速，t 为该卫星在所在 GNSS 星座时间系统下的测量时刻（由 GNSS 广播电文得到），t_D 为该改正数在所在 SNT 时间系统下的参考时刻（由 SBAS 增强电文得到）。

对 GNSS 卫星轨道的改正值 $\left[\delta x(t) \quad \delta y(t) \quad \delta z(t)\right]^{\mathrm{T}}$ 如式(9)所示：

$$\begin{bmatrix}\delta x(t)\\ \delta y(t)\\ \delta z(t)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\delta x\\ \delta y\\ \delta z\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\delta\dot{x}\\ \delta\dot{y}\\ \delta\dot{z}\end{bmatrix}\times\left(t-t_{D}\right) \tag{9}$$

其中，$\left[\delta x \quad \delta y \quad \delta z\right]^{\mathrm{T}}$ 为卫星轨道偏差改正数；$\left[\delta\dot{x} \quad \delta\dot{y} \quad \delta\dot{z}\right]^{\mathrm{T}}$ 为卫星轨道偏差变化率改正数。

当 DFMC SBAS SNT 以某一 GNSS 时间系统为基准——例如以 BDT 为基准时，时间参考标识为 3（见表 3），表明 DFMC SBAS SNT 以 BDT 为基准，式(1)和式(2)中的 t_D 将为 BDT 下的时间。此时，若用户仅使用 BDS 进行增强定位，不存在问题；但如果用户同时使用 GPS 或其他 GNSS 进行增强定位，则需要将式(1)和式(2)中 t 从其所在 GNSS 星座时间系统转换至 BDT 之下，否则会将不同 GNSS 时间系统之间的差异引入定位解算中。具体地，当用户使用 GPS 卫星进行增强定位时，由于 GPST 与 BDT 之间相差固定的 14 s，因此对于 GPS 卫星的钟差改正值 $\delta\Delta t_{SV}^{GPS}$ 有：

$$\delta\Delta t_{SV}^{GPS}=\frac{\delta B+\delta\dot{B}\times\left(t-14-t_{D}\right)}{c} \tag{10}$$

对于 GPS 卫星的轨道改正值 $\left[\delta x^{GPS}(t) \quad \delta y^{GPS}(t) \quad \delta z^{GPS}(t)\right]^{\mathrm{T}}$ 有：

$$\begin{bmatrix}\delta x^{GPS}(t)\\ \delta y^{GPS}(t)\\ \delta z^{GPS}(t)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\delta x\\ \delta y\\ \delta z\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\delta\dot{x}\\ \delta\dot{y}\\ \delta\dot{z}\end{bmatrix}\times\left(t-14-t_{D}\right) \tag{11}$$

由于 GPST、BDT 与 GST 之间的整秒差异是固定的，因此很容易通过上述方式完成转换处理。但对于 GLONASS 而言，由于 GLONASST 与其他 GNSST 之间整秒差异不是固定的，而存在一个随时间变化的闰秒（这是由于 GLONASST 随 UTC 进行闰秒而其他 GNSST 不随 UTC 进行闰秒所导致的），因此无法通过在接收机中进行预设的方式解决。相比其他 GNSS，用户必须接收 GLONASS 广播电文的闰秒信息，才能完成 GLONASS 与其他 GNSS 的 DFMC 模式兼容定位。

从 SBAS 互操作层面，这意味着所有 DFMC SBAS 接收机必须增强 GLONASS，否则就无法使用 SDCM 播发的改正数信息。这并不符合 DFMC SBAS 服务的设计和开发目。因此，在 2020 年 11 月召开的 ICAO NSP/6 会议上，DS2 工作组给出了 DFMC SBAS SNT 与被增强星基参考时间之间的转换关系[22]，以实现 DFMC SBAS 的 GNSS 时间兼容问题，见表 2 所

示。

表 2　DFMC SBAS SNT 与被增强星座参考时间之间的转换关系

Table 2　Conversion relationship between the DFMC SBAS SNT and the reference time of the augmented constellation

MT37 中的时间参考标识		0 (GPS)	1 (GLONASS)	2 (GALILEO)	3 (BDS)
被增强星座	GPS	$t^{(\mathrm{SNT}=0)}=t^{(\mathrm{GPST})}$	$t^{(SNT=1)}=t^{(GPST)}-\Delta t_{LS}+10800\ \mathrm{s}$	$t^{(\mathrm{SNT}=2)}=t^{(\mathrm{GPST})}$	$t^{(\mathrm{SNT}=3)}=t^{(\mathrm{GPST})}-14\ \mathrm{s}$
	GLONASS	$t^{(SNT=0)}=t^{(GLONASST)}+\Delta t_{LS}-10800\ \mathrm{s}$	$t^{(\mathrm{SNT}=1)}=t^{(\mathrm{GLONASST})}$	$t^{(SNT=2)}=t^{(GLONASST)}+\Delta t_{LS}-10800\ \mathrm{s}$	$t^{(SNT=3)}=t^{(GLONASST)}+\Delta t_{LS}-10800\ \mathrm{s}$
	Galileo	$t^{(\mathrm{SNT}=0)}=t^{(\mathrm{GST})}$	$t^{(SNT=1)}=t^{(GST)}-\Delta t_{LS}+10800\ \mathrm{s}$	$t^{(\mathrm{SNT}=2)}=t^{(\mathrm{GST})}$	$t^{(\mathrm{SNT}=3)}=t^{(\mathrm{GST})}-14\ \mathrm{s}$
	BDS	$t^{(\mathrm{SNT}=0)}=t^{(\mathrm{BDT})}+14\ \mathrm{s}$	$t^{(SNT=1)}=t^{(BDT)}-\Delta t_{LS}+10800\ \mathrm{s}$	$t^{(\mathrm{SNT}=2)}=t^{(\mathrm{BDT})}+14\ \mathrm{s}$	$t^{(\mathrm{SNT}=3)}=t^{(\mathrm{BDT})}$

注：Δt_{LS}为 BDS、GPS、GALILEO 与 GLONASS 参考时间的闰秒差，利用 GNSS 导航电文信息进行解算

4　测试与分析

前期，BDSBAS 已根据 SF SBAS 国际标准中的时间基准要求开展建设，相关服务性能满足 ICAO 标准要求。针对 DFMC SBAS 国际标准中的这一最新技术要求和动态，BDSBAS 对地面段监测处理能力与流程进行了升级，以确保 DFMC 模式下的 GNSS 改正数是相对于各自 GNSST 下的。

4.1　BDSBAS 时间基准测试

2021 年 5 月 8 日至 6 月 21 日，在 BDSBAS 数据处理中心（西安）和北斗系统主控站（北京）架设共视接收机，进行了连续 45 天的观测。通过卫星共视时间传递方法，对 BDSBAS SF SNT、DFMC SNT 与相应 GNSS 时间基准之间的偏差进行了计算和评估。

4.1.1　SF 时间基准测试

对于 SF SBAS SNT 而言，目前 SF SBAS SARPs 国际标准中要求选择 GPST 或者 GLONASST 作为基准。因此，BDSBAS SF SNT 采用在 BDT 基础上增加 14 s 整秒时间的方式，以实现与 GPST 同步的目的，从而满足 ICAO 当前标准要求。通过卫星共视时间传递方法计算得到了 BDSBAS SF SNT 与 GPST 之间的时间偏差，结果如图 3 所示。

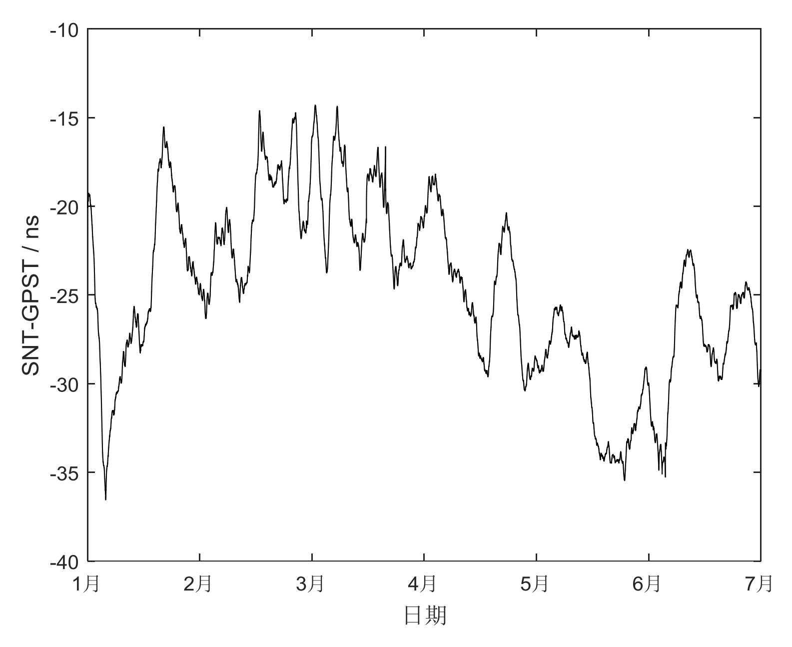


图 3　BDSBAS SF SNT 与 GPST 之间的偏差

Fig.3　Difference between BDSBAS SF SNT and GPST

由图 3 结果可知，BDSBAS SF SNT 与 GPST 之间的最大偏差为 37 ns，满足 SF SBAS SARPs 中的 50 ns 指标要求。

4.1.2　DFMC 时间基准测试

对于 DFMC SBAS SNT 而言，DFMC SBAS SARPs 标准允许其从四大核心 GNSS 的系统时间中自行选择。因此，BDSBAS DFMC SNT 选择以 BDT 为基准、与 BDT 之间进行同步。通过卫星共视时间传递方法计算得到了 BDSBAS DFMC SNT 与 BDT 之间的时间偏差，结果如图 4 所示。

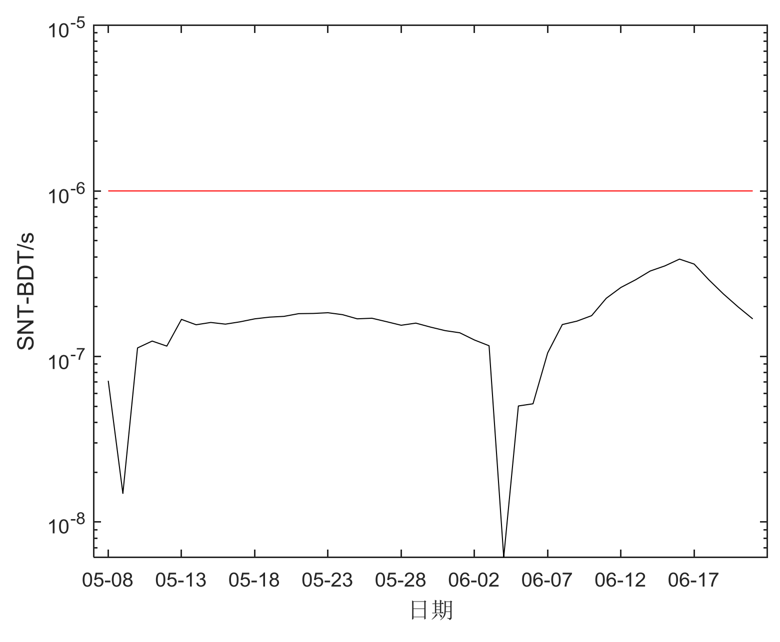


图 4　BDSBAS DFMC SNT 与 BDST 之间的偏差

Fig.4　Difference between BDSBAS SF SNT and GPST

由图 4 结果可知，BDSBAS DFMC SNT 与 BDT 之间的最大偏差为 0.17 μs，满足 DFMC

SBAS SARPs 中的 1 μs 指标要求。

4.2 BDSBAS 服务性能测试

BDSBAS 服务性能测试选用 BDSBAS 北京监测站 2021 年 6 月 15 日 1 秒采样数据，增强电文采用 BDSBAS PRN130 卫星播发的增强信息。

4.2.1 SF 服务性能测试

北京站的定位误差直方图和斯坦福图分布如图 5 和图 6 所示。

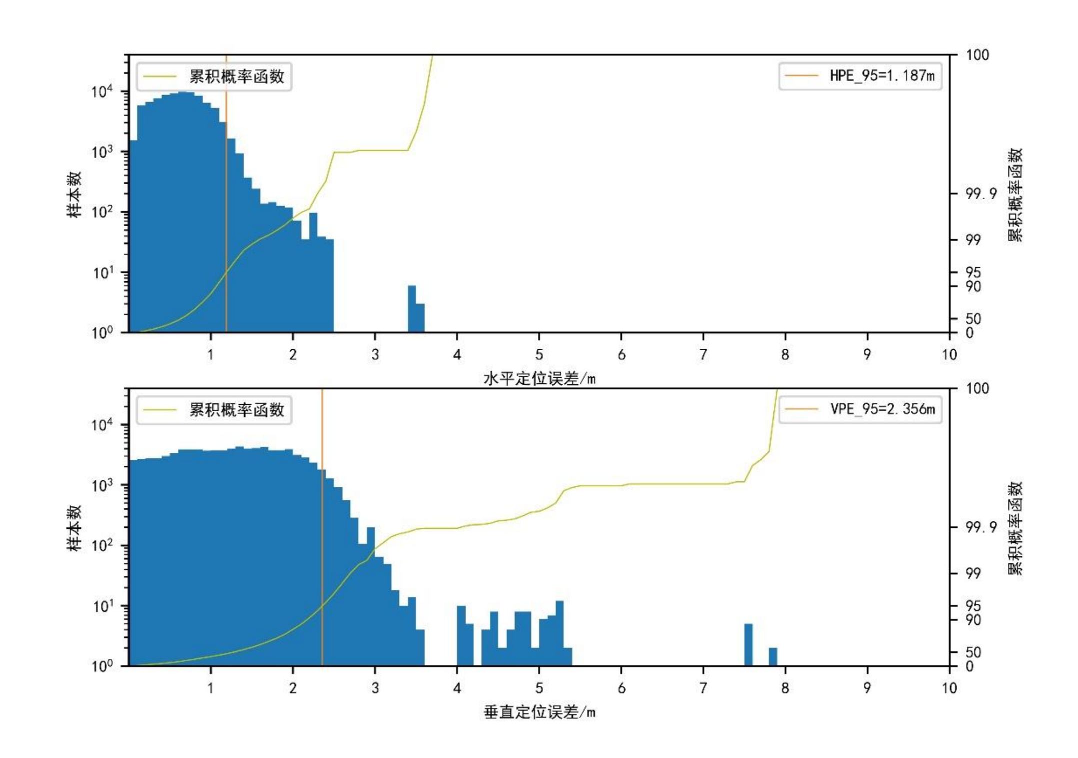


图 5　2021 年 6 月 15 日 BDSBAS 单频服务北京站定位误差统计直方图

Fig.5　Positioning error histogram of BDSBAS SF service at Beijing station (June 15, 2021)

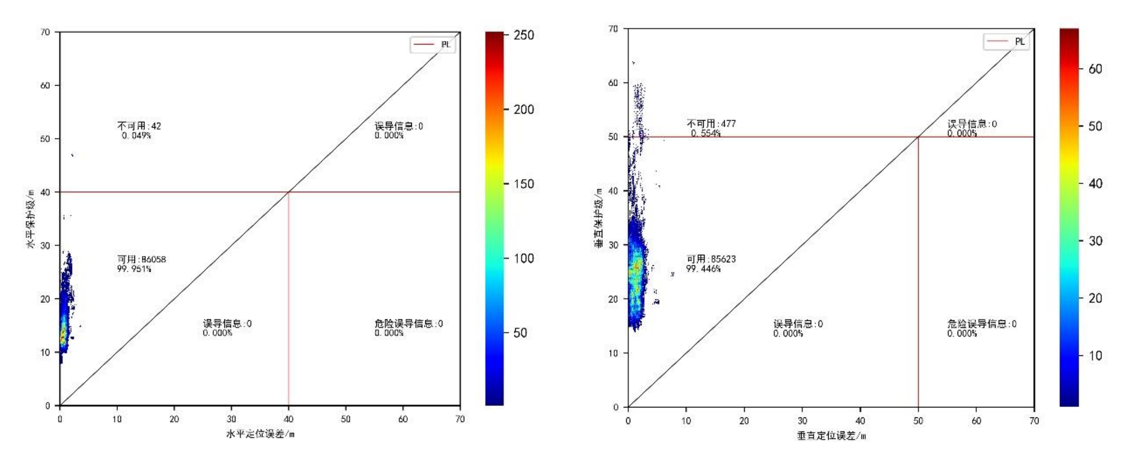


图 6　2021 年 6 月 15 日 BDSBAS 单频服务北京站水平/垂直斯坦福图

Fig.6　Horizontal/vertical Stanford chart of BDSBAS SF service at Beijing station (June 15, 2021)

统计得到水平精度（95%）为 1.187m，垂直精度（95%）为 2.356m；APV-I 可用性为 99.446%；连续性为 99.079%；水平和垂直最小安全因子分别为 4.107 和 3.098；计算时段内

未发生 HMI 事件。可以看到，北京站的 BDSBAS 单频服务的定位精度、可用性满足 ICAO APV-I 服务等级要求；并且最小水平/垂直安全因子均大于 1，保护级将定位误差完全包络，HMI 事件发生次数为 0，表明完好性参数可满足能够为用户提供可靠的完好性保障。

4.2.2　DFMC 服务性能测试

北京站的定位误差直方图和斯坦福图分布如图 7 和图 8 所示。

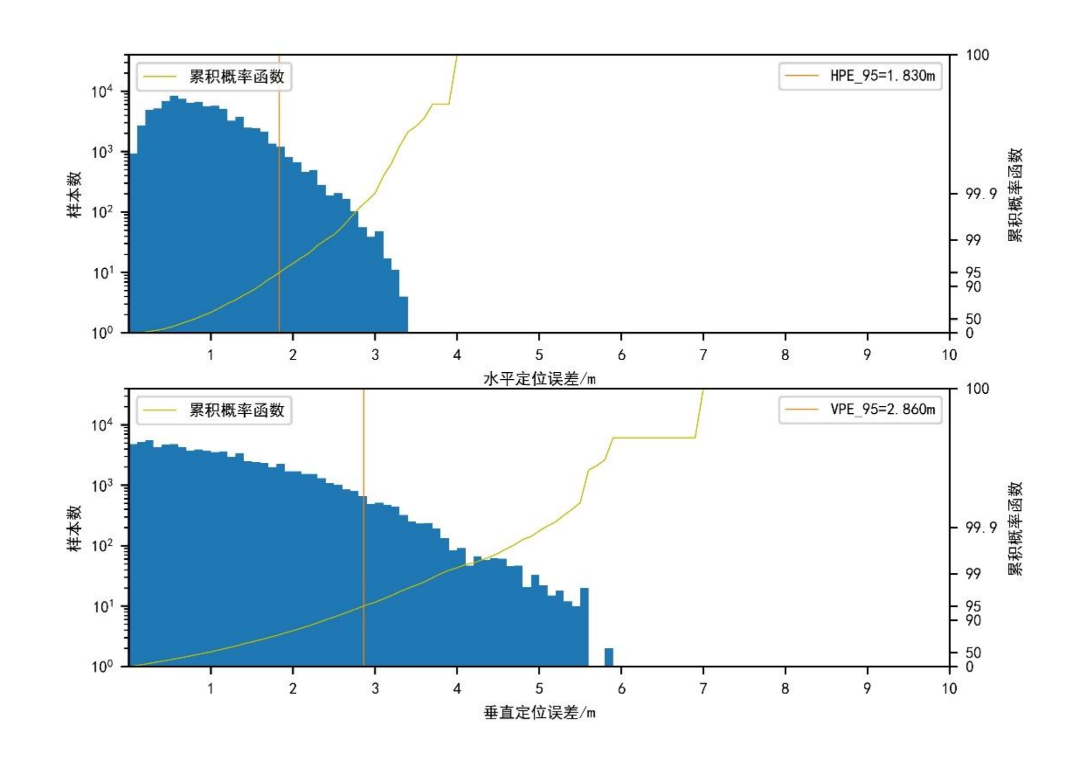


图 7 2021 年 6 月 15 日 BDSBAS DFMC 服务北京站定位误差统计直方图

Fig.7　Positioning error histogram of BDSBAS DFMC service at Beijing station (June 15, 2021)

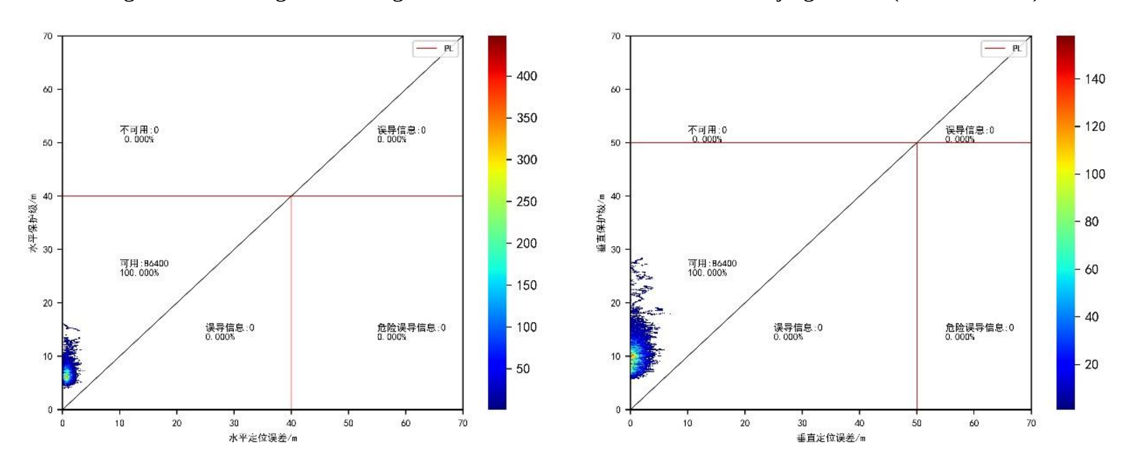


图 8 2021 年 6 月 15 日 BDSBAS DFMC 服务北京站水平/垂直斯坦福图

Fig.8　Horizontal/vertical Stanford chart of BDSBAS DFMC service at Beijing station (June 15, 2021)

统计得到水平精度（95%）为 1.830m，垂直精度（95%）为 2.860m；APV-I 可用性为 100.00%；连续性为 100.00%；水平和垂直最小安全因子分别为 1.872 和 2.581；计算时段内未发生 HMI 事件。可以看出，BDSBAS DFMC 服务定位精度较单频稍差。其原因在于，虽然 BDS B1C/B2a 双频组合消除掉了电离层影响，但会放大伪距测量噪声，导致最终该组合

模型噪声较大，定位误差稍大于单频结果。但另一方面，由于双频测量不受电离层格网点分布、是否可用影响，可用于增强定位的卫星数量增多、弧段边长使双频服务的覆盖范围明显增大，因此可用性、连续性等有所提升。评估时段内的 BDSBAS DFMC 服务性能满足 APV-I 等级要求。

5 结论

本文介绍了 SNT 的基本概念和互操作现状，结合 ICAO SBAS SAPRs 草案的制定进展，对 SNT 的兼容互操作问题进行了分析和研究。对于 SF SBAS SNT 而言，由于目前 SF SBAS SARPs 国际标准中只能选择 GPST 或者 GLONASST 作为基准，因此 BDSBAS SF SNT 选择暂时以 GPST 为基准、与 GPST 之间进行时间同步。后续，待 SF SBAS SAPRs 标准修订工作重新启动、推进北斗进入 SF SBAS SAPRs 后，将升级为以 BDT 为基准。对于 DFMC SBAS，由于需要对多个 GNSS 星座进行增强，涉及到更多的时间基准系统，因此 SNT 的互操作实现比 SF SBAS 更为复杂。为此，ICAO SBAS SARPs 标准联合工作组研究和制定了 DFMC SBAS SNT 与被增强 SBAS 参考时间之间的转换关系，以实现 DFMC SBAS 的 GNSS 时间兼容。

针对 SBAS 互操作时间基准的上述国际标准最新要求，BDSBAS 进行了软硬件状态升级与服务性能初步测试。结果表明，对于 SF 模式而言，BDSBAS SNT 与 GPST 之间的偏差最大为 37 ns，满足 ICAO 标准中的 50 ns 指标要求；对于 DFMC 模式而言，BDSBAS SNT 与 BDT 之间的时间偏差最大值为 0.17 μs，满足 ICAO 标准中的 1 μs 指标要求。在时间同步基础上，进一步开展了 BDSBAS 服务性能测试。结果表明，测试期间 BDSBAS SF 服务的精度、可用性满足 ICAO APV-I 指标要求，但连续性未能达标；BDSBAS DFMC 服务的精度、可用性、连续性均满足 ICAO APV-I 指标要求。测试结果证明了 BDSBAS 时间基准互操作方法的可行性和可靠性。

后续，BDSBAS 将继续开展 ICAO 国际标准的联合研究与制定工作，并积极推进北斗进入 SF SBAS SARPs 标准、成为 SF SBAS 服务增强选择对象。同时，持续开展系统建设与服务性能优化，以早日提供符合 ICAO 国际标准的高性能、高安全性航空导航增强服务。

参考文献：

[1] JASON B. Wide area augmentation system (WAAS) update [R]. Changsha, China: SBAS IWG 30, 2016.

[2] JASON B. Wide Area Augmentation System (WAAS) program overview [R]. Australia: SBAS IWG 35, 2019.

[3] 邵搏, 耿永超, 丁群, 等. 国际星基增强系统综述 [J]. 现代导航, 2017, 6(3):157-161.
SHAO Bo, GENG Yongchao, DING Qun, et al. Summarize of international satellite based augmentation system [J]. Modern Navigation, 2017, 6(3): 157-161.

[4] European Satellite Services Provider (ESSP). EGNOS performance and LPV implementation status [R]. Changsha, China: SBAS IWG 30, 2016.

[5] NATHALIE R. EGNOS programme status [R]. Changsha, China: SBAS IWG 30, 2016.

[6] MASASHI G. MSAS status [R]. Changsha, China: SBAS IWG 30, 2016.

[7] HIDETSUGU W. MSAS status and future plan [R]. Australia: SBAS IWG 35, 2019.

[8] Airports Authority of India (AAI). GPS aided GEO augmented navigation (GAGAN) [R]. Changsha, China: SBAS IWG 30, 2016.

[9] Airports Authority of India (AAI). GPS aided GEO augmented navigation (GAGAN) [R]. Senegal: SBAS IWG 31, 2016.

[10] China Satellite Navigation Office (CSNO). SDCM [EB/OL]. [2021-07-20].

http://www.beidou.gov.cn/zy/kpyd/201710/t20171023_4777.html
[11] European Space Agency (ESA). SDCM [EB/OL]. [2021-07-20]. https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/SDCM
[12] EUNSUNG L. Korea SBAS program [R]. Changsha, China: SBAS IWG 30, 2016.
[13] ASECNA. SBAS for Africa and Indian Ocean initiative [R]. Ghana: Twenty-Second Meeting for the AFI Planning and Implementation Regional Group, 2019.
[14] ASECNA. Update on "SBAS for Africa and Indian Ocean" (A-SBAS) development [R]. Montreal: ICAO NSP Sixth Meeting, virtual meeting, 2020.
[15] Jeffrey Bollard, Simon Reynolds. Southern Positioning Augmentation Network Program Update [R]. Montreal: ICAO NSP Sixth Meeting, virtual meeting, 2020.
[16] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统应用服务体系（1.0 版）[R]. 北京: 中国卫星导航系统管理办公室, 2019.
[17] Civil Aviation Administration of China (CAAC). The new service provider ID and UTC standard ID for BDSBAS [R]. Montreal: ICAO NSP 4th Meeting, 2017.
[18] LIU Cheng, GAO Weiguang, SHAO Bo, et al. Development of BeiDou satellite-based augmentation system [J]. Navigation, 2021, 68(2): 405-417.
[19] 陈谷仓, 刘成, 卢鋆. 北斗星基增强系统服务等级与系统性能分析 [J]. 测绘科学, 2021, 46(1): 42-48.
CHEN Gucang, LIU Cheng, LU Jun. Service level and system performance analysis of BDSBAS [J]. Science of Surveying and Mapping, 2021, 46(1): 42-48.
[20] 邵搏, 丁群, 耿永超, 等. 双频多星座星基增强系统电文综述 [C]. 第 29 届中国飞行器测控学术会议, 中国, 上海, 2018: E-07.
SHAO Bo, DING Qun, GENG Yongchao, et al. The Summarize of dual-frequency multi-constellation satellite-based augmentation system messages [J]. Shanghai: The 29th Conference of Spacecraft TT&C Technology, 2018: E-07.
[21] IWG. Satellite-based augmentation system dual-frequency multi-constellation definition document [R]. Senegal: SBAS IWG 31, 2016.
[22] DS2 rapporteur. Proposed amendments to Annex 10, Volume I: Satellite-based augmentation system (SBAS) provisions [R]. ICAO NSP Sixth Meeting, virtual meeting, 2020.
[23] United States Naval Observatory (USNO). USNO [EB/OL]. [2021-07-20]. https://www.usno.navy.mil/USNO.
[24] 刘成, 李芳. 卫星轨道误差对定位精度影响的摄动分析分析[J]. 天文研究与技术, 2018, 15(1): 40-45.
[25] Leap Second. GPS, UTC, and TAI Clocks [EB/OL]. [2021-07-20]. http://www.leapsecond.com/java/gpsclock.htm#:~:text=UTC%2C%20Coordinated%20Universal%20Time%2C%20popularly%20known%20as%20GMT,clocks%20in%20the%20GPS%20ground%20control%20stations%20and
[26] IS-GPS-200. NAVSTAR GPS Space Segment/Navigation User Interfaces [S]. PNT Capability Area Integration, Portfolio Architect Space and Missile Systems Center, 2021.
[27] BDS-SIS-ICD-B1C-1.0. 北斗卫星导航系统空间信号接口空间信号接口控制文件公开服务信号 B1C（1.0 版）[S]. 北京: 中国卫星导航系统管理办公室, 2017.
BDS-SIS-ICD-B1C-1.0. BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document Open Service Signal B1C (Version 1.0) [S]. Beijing: China Satellite Navigation Office, 2017.
[28] 高星伟, 过静珺, 程鹏飞, 等. 基于时空系统统一的北斗与 GPS 融合定位 [J]. 测绘学报, 2012, 41(5):743-755.
GAO Xingwei, GUO Jingjun, CHENG Pengfei, et al. Fusion positioning of Compass/GPS based on spatio

temporal system unification [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2012, 41(5): 743-748, 755.

[29] ERIC C, NATALIA C. UPDATE TO GALILEO OPEN SERVICE DRAFT SARPS [R]. ICAO NSP GSSVWG Meeting, virtual meeting, 2020.

[30] 刘庆元, 包海, 王虎, 等. GPS、GLONASS、GALILEO 三大系统间时间系统以及坐标系统的转换 [J]. 测绘科学, 2008, 33(5): 13-15.

LIU Qingyuan, BAO Hai, WANG Hu, et al. The transformation and coordinates transformation among GPS, GLONASS and GALILEO [J]. Science of Surveying and Mapping, 2008, 33(5): 13-15.

[31] ICAO. International Standards and Recommended Practices Annex10 Aeronautical Telecommunications Volume I Radio Navigation Aids [S]. Senegal: 2018.

第一作者简介：刘成（1987-），男，博士，研究方向：卫星导航与定位、多源融合导航、集成电路设计与开发。Email: liucheng@beidou.gov.cn